

文章编号: 1001-8360(2016)03-0059-07

应用于城轨交通供电系统的超级电容 储能装置稳定性研究

陈怀鑫, 杨中平, 林 飞, 夏 欢, 王 彬

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘 要: 超级电容储能装置应用于城轨交通供电系统具有节能稳压效果, 并且其对供电系统的运行稳定性也会产生重要影响。本文基于小信号分析法分析了超级电容储能装置单个子系统的运行稳定性, 并提出电流反馈补偿虚拟并联电阻的方法, 降低超级电容储能装置的闭环输出阻抗, 改善应用于城轨交通供电系统的超级电容储能装置运行稳定性。仿真和实验结果验证了本文提出的电流反馈补偿方法的有效性。

关键词: 超级电容; 稳定性; 反馈补偿; 输出阻抗; 城轨交通供电系统

中图分类号: TM315 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.03.008

Stability Research of Stationary Super-capacitor Energy Storage System Applied in Urban Rail Power Supply System

CHEN Huaixin, YANG Zhongping, LIN Fei, XIA Huan, WANG Bin

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The application of super-capacitor energy storage device in urban rail power supply system can save energy and improve voltage profile, and will make a real difference to the operation stability of urban rail power supply system. Firstly, this paper analyzed the operation stability of single super-capacitor energy storage device through small signal analysis. Then, a practical method by using electric current feedback compensation to emulate virtual shunt resistor was put forward to reduce the closed-loop output impedance of the super-capacitor energy storage device and improve the operation stability of the device. Simulation and experimental results validated the effectiveness of the proposed current feedback compensation method.

Key words: super-capacitor; stability; feedback compensation; output impedance; urban rail power supply system

中国已成为世界上城市轨道交通发展最迅速的国家,城市轨道交通具有运量大、定时、安全、环保等显著优点,但依然存在网压波动和再生制动能量浪费问题。

将超级电容储能装置应用于城轨交通供电系统来抑制网压波动和回收制动能量,近年来得到了大量的研究^[1-6]。文献^[1-4]提出不同的超级电容充放电控制策略以及容量配置优化方法,使超级电容储能装置应用在城轨交通供电系统中得到很好的节能稳压效果,然而这些文献却忽略了储能装置应用于城轨交通供电系统后的稳定性问题研究。文献^[7]研究了超级电容储能装置应用于分布式发电系统的能量管理和稳定性问题,其中提出可以通过降低超级电容储能装置单个

子系统的闭环输出阻抗,来改善整个系统稳定性或带载能力,但是并没有提出降低超级电容储能装置输出阻抗的具体方法。本文的研究目标正是提出一种降低超级电容储能装置输出阻抗的具体方法以提高储能装置应用于城轨交通供电系统后整个供电系统的运行稳定性。

基于 Middlebrook 准则和阻抗分析法,在城轨交通供电系统中,如果源变换器的闭环输出阻抗幅值远小于负载变换器的闭环输入阻抗幅值,可以使系统 Z_{out}/Z_{in} 的奈氏曲线远离禁止区域,实现系统源变换器和负载变换器之间的动态解耦,减弱源端和负载端之间的相互作用力,整个系统必然稳定^[8-9]。

本文采用小信号分析法和阻抗分析法,分析超级电容储能装置单个子系统的稳定性和闭环输出阻抗特

收稿日期:2014-10-12;修回日期:2015-05-15
作者简介:陈怀鑫(1991—),男,福建龙溪人,硕士研究生。
E-mail:13121389@bjtu.edu.cn

性,并通过在控制中加入电流反馈补偿虚拟并联电阻的方法,减小超级电容储能装置单个子系统的闭环输出阻抗,进而减小超级电容储能装置与城轨交通供电系统连接在一起后的总源端闭环输出阻抗,以改善整个城轨交通供电系统的稳定性。

1 超级电容储能装置控制策略及稳定性分析

1.1 超级电容储能装置控制策略

城市轨道交通供电系统是一个分布式供电系统,其原理图见图 1。变电所通过二极管不控整流机组将交流电网转化为直流母线电压,负载变换器将直流母线电压转化成不同电压等级的交直流电能供给不同负载。

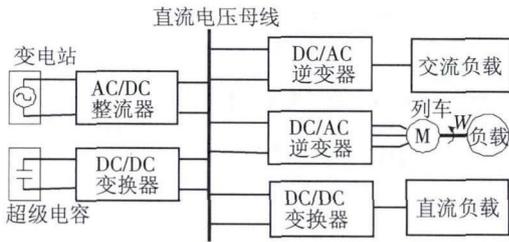
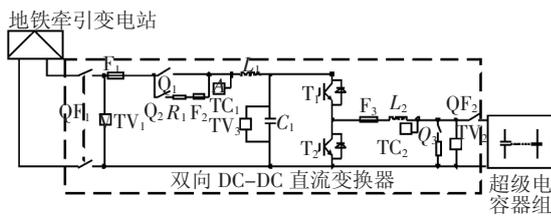


图 1 超级电容应用于城轨交通分布式供电系统

将超级电容储能装置通过双向 DC/DC 变换器连接在城轨交通供电系统的直流电压母线上,有节能和稳压的作用。当列车牵引时,直流侧电压下降,超级电容储能装置放出电能维持电压恒定;当列车制动时,直流侧电压上升,超级电容储能装置通过吸收列车再生制动能量,可以有效降低制动能量消耗在制动电阻上造成的能量浪费和隧道温升。

图 2 是超级电容储能装置的主电路结构,其中采用了非隔离型双向 buck-boost 变换器。在大功率条件下,这种拓扑具有结构简单,控制方便,可靠性高等优点。

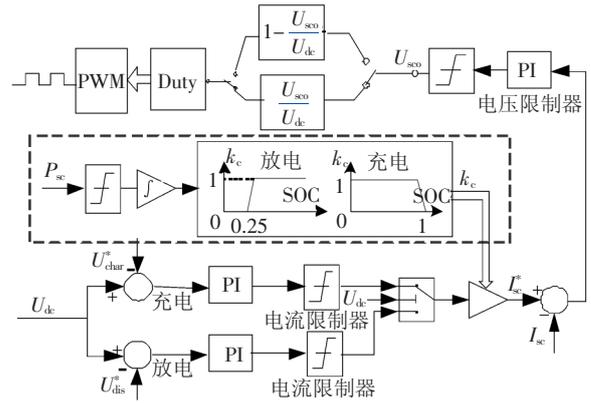


T 为开关管;QF 为断路器;F 为熔断器;R 为电阻;L 为电感;C 为电容;TC 为电流表;TV 为电压表。

图 2 超级电容储能装置主电路结构

为实现超级电容储能装置节能稳压的作用,双向 DC/DC 变换器采用电压电流双闭环的控制方式,外环为直流牵引网电压环,内环为超级电容电流环,根据直流牵引网电压实际值与指令值之间误差的大小确定充

放电电流的大小和方向。图 3 为超级电容储能装置双环控制策略。

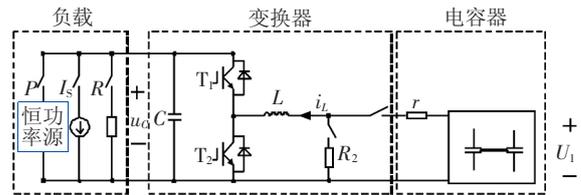


U_{dk} 为直流网电压; U_{dc}^* 为超级电容储能装置充电阈值;
 U_{dc}^* 为超级电容储能装置放电阈值。

图 3 超级电容储能装置双环控制策略

1.2 超级电容储能装置小信号稳定性分析

为分析超级电容储能单个子系统的运行稳定性,图 4 给出了超级电容储能装置双向 buck/boost 变换器接不同负载的拓扑结构,3 种不同的负载分别为恒阻性负载 R 、恒流源负载 I_s 、恒功率负载 P 。本文对双向 buck/boost 变换器上下管 IGBT 采用互补驱动方式。



U_1 为超级电容电压; R_2 为超级电容模组泄放电阻。

图 4 超级电容储能装置接不同负载电路

对超级电容储能装置单独接恒功率负载情况进行分析。在小信号意义上,恒功率负载的变换器从其输入端口看具有负阻性,如电机的频率控制、DC/DC 变换器的恒压输出控制等。采用状态空间平均法,可得出超级电容储能装置接恒功率负载的电路状态方程。

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -ri_L - (1-d) \times u_c + U_1 \\ C \frac{du_c}{dt} = (1-d) \times i_L - \frac{p}{u_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_1 为超级电容电压; u_c 为直流母线电压; i_L 为电感电流; p 为负载恒功率; d 为 T_2 占空比。

对式(1)施加小信号扰动 $u_c = U_C + \hat{u}_c, i_L = I_L + \hat{i}_L, p = P + \hat{p}, d = D + \hat{d}$,消去稳态分量且忽略二阶扰动,经过推导可以得到式(2)。

再根据超级电容储能装置控制策略和电路结构,可列出超级电容储能装置控制框图,见图 5。

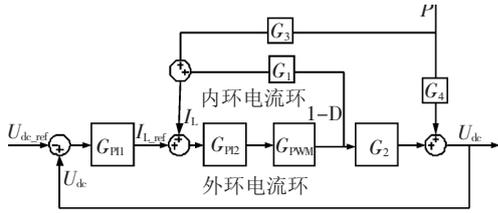


图 5 超级电容储能装置控制框图

$$\begin{cases} \left(Ls + r + \frac{(1-D)^2 \times U_c}{C_s \times U_c - (1-D) \times I_L} \right) \hat{i}_L(s) = \\ \left(-U_c - \frac{(1-D) \times I_L \times U_c}{C_s \times U_c - (1-D) \times I_L} \right) \times \hat{d}(s) + \\ \frac{1-D}{C_s \times U_c - (1-D) \times I_L} \hat{p}(s) \\ \left(C_s \times U_c - (1-D) \times I_L + \frac{(1-D)^2 \times U_c}{Ls + r} \right) \hat{u}_c(s) = \\ \left(I_L \times U_c - \frac{(1-D) \times U_c^2}{Ls + r} \right) \times \hat{d}(s) - \hat{p}(s) \end{cases} \quad (2)$$

$$G_1 = \frac{-C_s U_c^2}{(Ls + r)(C_s U_c - (1-D)I_L) + (1-D)^2 U_c} \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{(Ls + r)I_L U_c - (1-D)U_c^2}{(Ls + r)(C_s U_c - (1-D)I_L) + (1-D)^2 U_c} \quad (4)$$

$$G_3 = \frac{1-D}{(Ls + r)(C_s U_c - (1-D)I_L) + (1-D)^2 U_c} \quad (5)$$

$$G_4 = \frac{-(Ls + r)}{(Ls + r)(C_s U_c - (1-D)I_L) + (1-D)^2 U_c} \quad (6)$$

图 5 及上式中: s 为复频率; G_1 、 G_2 为占空比到电感电流、直流侧电压的传递函数; G_3 、 G_4 为输出功率到电感电流、直流侧电压的传递函数。它们的大小分别如式(3)~式(6)所示。

根据超级电容储能装置控制框图,可以得到系统输出功率到母线电压的闭环传递函数,见式(7)。

$$\frac{\hat{u}_c(s)}{\hat{p}(s)} = \frac{(1 - G_1 G_{PI2} G_{PWM}) G_4 + G_3 G_2 G_{PI2} G_{PWM}}{1 - G_1 G_{PI2} G_{PWM} - G_{PI1} G_2 G_{PI2} G_{PWM}} \quad (7)$$

图 6 为式(7)传递函数零极点分布随系统输出功率变化的规律。随着储能装置输出功率的增加,极点位置右移,母线电压稳定性降低。当输出功率超出稳定范围,极点穿越虚轴,直流母线电压发散振荡,见图 7。

对超级电容储能装置接恒流源负载情况进行小信号分析,也可以得到系统恒流源负载电流到母线电压的闭环传递函数,其零极点分布变化规律,见图 8。随着负载恒流源 I_s 增加,传递函数极点位置右移,母线

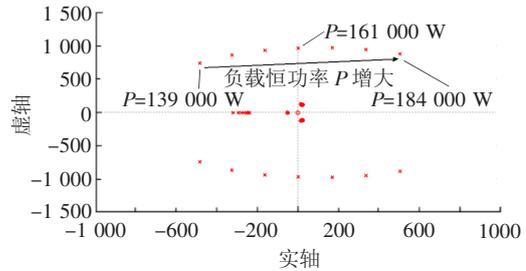


图 6 输出功率对式(7)传递函数零极点分布的影响

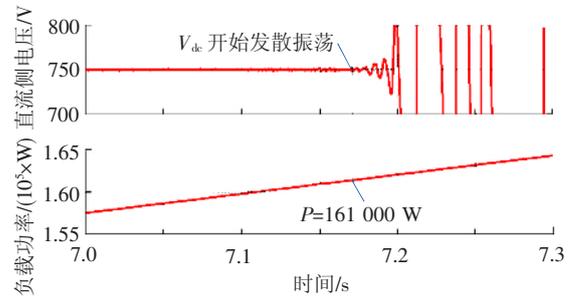


图 7 输出功率对直流母线电压稳定性的影响

电压稳定性降低。当恒流源电流达到 214 A 时,极点穿越虚轴,直流母线电压发散振荡,见图 9。

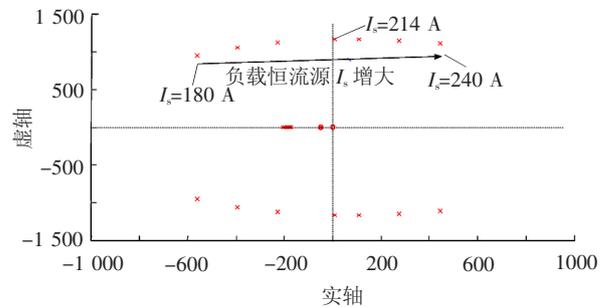


图 8 负载电流对系统闭环传递函数零极点分布的影响

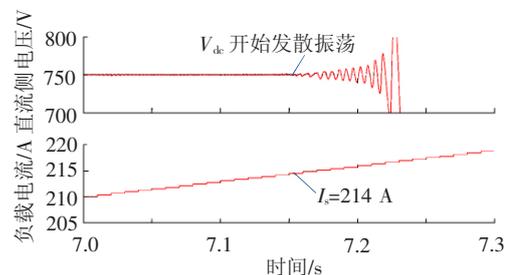


图 9 负载电流对直流母线电压稳定性的影响

从以上分析可得出,超级电容储能装置单个子系统在不加入优化控制方法的前提下,直流侧电压随超级电容储能装置输出电流或输出功率的增大出现振荡,超级电容储能装置的稳定性较低。应用于城轨交通供电系统后,超级电容储能装置的不稳定会破坏整个供电系统的稳定性,因此有必要对超级电容储能装置的稳定性和输出阻抗进行优化。

2 超级电容储能装置输出阻抗分析

在考察超级电容储能装置单个子系统的输出阻抗时,为了避免后级负载效应的影响,储能装置的输出端口应连接电流负载进行计算和分析,因为电流负载的小信号模型为开路,不会引入阻抗计算。

图 10 是超级电容储能装置接恒流源负载的小信号模型。图 11 是超级电容储能装置接恒流源负载并采用电压外环、电流内环双环控制策略的系统控制框图。

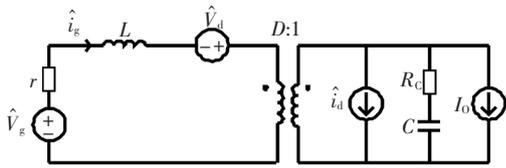


图 10 超级电容储能装置小信号模型

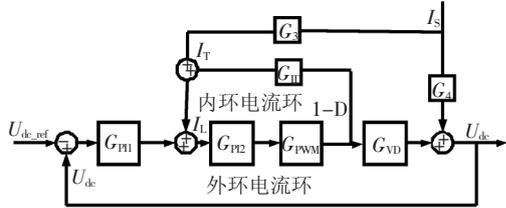


图 11 超级电容储能装置接恒流源控制框图

由上述系统小信号模型和控制原理框图,可推导超级电容储能装置的闭环输出阻抗。

$$Z_o = \frac{(Ls + r) \times \left(\frac{1}{Cs} + R_c \right)}{\left(\frac{1}{Cs} + R_c \right) D^2 + Ls + r} \quad (8)$$

$$G_{VD} = \frac{[DV - I(Ls + r)] \times \left(\frac{1}{Cs} + R_c \right)}{\left(\frac{1}{Cs} + R_c \right) D^2 + Ls + r} \quad (9)$$

$$G_{ID} = \frac{V + DI \left(\frac{1}{Cs} + R_c \right)}{\left(\frac{1}{Cs} + R_c \right) D^2 + Ls + r} \quad (10)$$

$$T = \frac{G_{PI2} G_{PVM}}{1 - G_{PI2} G_{PVM} G_{ID}} G_{PI1} G_{VD} \quad (11)$$

$$Z_{oc} = \frac{Z_o}{1 + T} \quad (12)$$

式中: \$Z_o\$ 表示超级电容储能装置开环输出阻抗; \$G_{VD}\$ 表示占空比-输出电压传递函数; \$G_{ID}\$ 表示占空比-电感电流传递函数; \$T\$ 为回路增益; \$Z_{oc}\$ 为系统闭环输出阻抗。

基于 Middlebrook 准则,超级电容储能装置应用于城轨交通供电系统后,可通过降低超级电容储能装置的闭环输出阻抗,减小城轨交通供电系统的总源闭环输出阻抗,以提高系统的稳定性。

3 优化超级电容储能装置输出阻抗的方法

在分布式供电系统中,经常在母线中并联 RC 阻尼电路,以改善系统稳定性,实质上是降低了源输出阻抗。在超级电容储能装置输出端并联电阻 \$R\$,虽然能降低储能装置的输出阻抗,却会增大损耗。因此,我们可以采用将输出电流反馈的控制方法,其小信号效果相当于在储能装置的输出端并联了一个虚拟电阻 \$R\$,以实现降低储能装置的输出阻抗,并且不会增大系统损耗。

3.1 超级电容储能装置并联 \$R\$ 的闭环输出阻抗表达式

超级电容储能装置输出端并联 \$R\$ 的小信号模型见图 12。

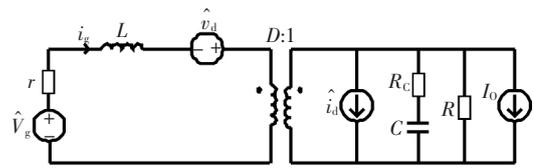


图 12 储能装置输出端并联 \$R\$ 的小信号模型

结合图 12 的小信号模型和图 11 的控制原理框图,可推导超级电容储能装置输出端并联 \$R\$ 的闭环输出阻抗 \$\tilde{Z}_{oc}\$。

$$\tilde{R} = \frac{\left(\frac{1}{Cs} + R_c \right) \times R}{\frac{1}{Cs} + R_c + R} \quad (13)$$

$$\tilde{Z}_o = \frac{(Ls + r) \times \tilde{R}}{\tilde{R} \times D^2 + Ls + r} \quad (14)$$

$$\tilde{G}_{VD} = \frac{[DV - I(Ls + r)] \times \tilde{R}}{\tilde{R} \times D^2 + Ls + r} \quad (15)$$

$$\tilde{G}_{ID} = \frac{V + DI \times \tilde{R}}{\tilde{R} \times D^2 + Ls + r} \quad (16)$$

$$\tilde{T} = \frac{G_{PI2} G_{PVM}}{1 - G_{PI2} G_{PVM} \tilde{G}_{ID}} G_{PI1} \tilde{G}_{VD} \quad (17)$$

$$\tilde{Z}_{oc} = \frac{\tilde{Z}_o}{1 + \tilde{T}} \quad (18)$$

式中: \$\tilde{R}\$ 是超级电容储能装置输出端电容支路和电阻 \$R\$ 并联后的总阻抗; \$\tilde{Z}_o\$ 表示超级电容储能装置输出端并联 \$R\$ 的开环输出阻抗; \$\tilde{G}_{VD}\$ 表示占空比-输出电压传递函数; \$\tilde{G}_{ID}\$ 表示占空比-电感电流传递函数; \$\tilde{T}\$ 为回路增益; \$\tilde{Z}_{oc}\$ 为超级电容储能装置输出端并联 \$R\$ 的闭环输出阻抗。

3.2 超级电容储能装置加入电流反馈补偿控制方法的闭环输出阻抗优化

在超级电容储能装置输出端并联 \$R\$ 的电路图,见

图 13。

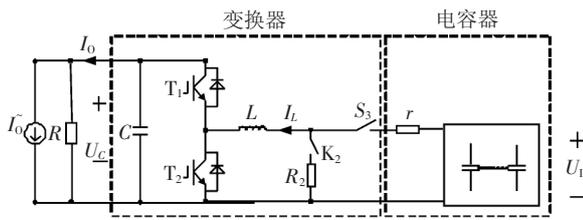


图 13 超级电容储能装置并联 R 的电路图

此时双向 buck/boost 变换器满足以下小信号关系

$$\Delta i_R = \frac{\Delta u_C}{R} \quad (19)$$

$$\Delta i_L = \frac{U_C}{U_1} \Delta i_O \quad (20)$$

$$\Delta \tilde{i}_O = \Delta i_O + \Delta i_R \quad (21)$$

若采用电流反馈补偿控制方法以实现在储能装置输出端虚拟并联电阻 R 的小信号效果,可以在储能装置双环控制中加入反馈采样控制器 H,使电感电流增大 Δi_L ,相应使负载电流增大 Δi_R ,见图 14。

$$\Delta i_R = \frac{\Delta u_C}{R} = \frac{U_1}{U_C} \Delta i_L \quad (22)$$

$$\Delta i_L = \frac{U_C \times \Delta u_C}{U_1 \times R} \quad (23)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{U_C \times \Delta u_C}{U_1 \times R \times \Delta t} \quad (24)$$

$$H = \frac{U_C}{U_1 \times R} \cdot s \quad (25)$$

根据上述反馈补偿方法,超级电容储能装置的闭环输出阻抗得到了优化降低,结合图 10 小信号模型和图 14 控制原理框图,可以推导储能装置加入电流反馈

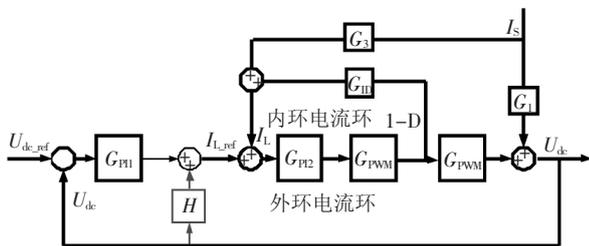


图 14 加入电流反馈补偿后的系统控制框图

补偿后的闭环输出阻抗 \hat{Z}_{out} 。

$$Z_{out} = \frac{(Ls + r) \times \left(\frac{1}{Cs} + R_C\right)}{\left(\frac{1}{Cs} + R_C\right) D^2 + Ls + r} \quad (26)$$

$$G_{VD} = \frac{[DV - I(Ls + r)] \left(\frac{1}{Cs} + R_C\right)}{\left(\frac{1}{Cs} + R_C\right) D^2 + Ls + r} \quad (27)$$

$$G_{ID} = \frac{V + DI \left(\frac{1}{Cs} + R_C\right)}{\left(\frac{1}{Cs} + R_C\right) D^2 + Ls + r} \quad (28)$$

$$\hat{T} = \frac{G_{PI2} G_{PWM}}{1 - G_{PI2} G_{PWM} G_{ID}} (G_{PI1} + H) G_{DV} \quad (29)$$

$$H = \frac{U_C}{U_1 \times R} \cdot s \quad (30)$$

$$\hat{Z}_{out} = \frac{Z_{out}}{1 + \hat{T}} \quad (31)$$

根据城轨交通供电系统的具体运行情况,提出的反馈补偿方法可以自由选择虚拟电阻 R 的大小对储能装置的闭环输出阻抗进行优化。在实际应用中,这种优化方法也十分容易实现。

4 仿真与实验

4.1 仿真

超级电容储能装置的仿真参数见表 1。将表中的参数分别带入上述公式中,可以分别得到超级电容储能装置在无优化、输出端并联电阻 R、控制中加入电流反馈补偿 3 种情况下的闭环输出阻抗,见图 15。

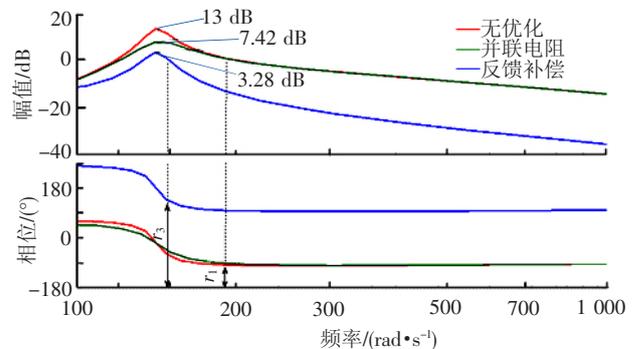


图 15 超级电容储能装置输出阻抗伯德图

在无优化的情况下,超级电容储能装置具有较大的输出阻抗峰值 13 dB。在输出端并联电阻 15 Ω 的情况下,超级电容储能装置的输出阻抗峰值为 7.42 dB;在采用电流反馈补偿的方法虚拟并联电阻 15 Ω 的情况下,超级电容储能装置的输出阻抗峰值为 3.28 dB。后 2 种情况都降低了储能装置的输出阻抗,改善了变换器的阻尼特性,而且采用电流反馈补偿方法的优化效果更加明显。后 2 种情况输出阻抗峰值的不同在于系统处于不同稳态工作点。另外,从图 15 中也可以看出,电流反馈补偿的方法也大幅增加了系统的正相角裕度。

图 16 是超级电容储能装置接恒流源负载 ($I_s = 50$ A) 在 1.5 s 切入电流反馈补偿的直流侧电压波形图。直流侧电压在系统切入电流反馈补偿后,振荡得

到有效抑制,稳定性得到提高。图 17 是超级电容储能装置的电流负载在 1.5 s 发生阶跃(30~50 A)的系统响应波形,系统加入电流反馈补偿后动态响应性能更好。

表 1 超级电容储能装置参数

参数	数值	参数	数值
电感 L/H	0.002 5	超级电容内阻 r/Ω	0.036
支撑电容 C/F	0.005	电容电阻 R_c/Ω	0.001
母线电压 U_c/V	750	超级电容电压 U_1/V	400
并联电阻 R/Ω	15	虚拟电阻 R/Ω	15

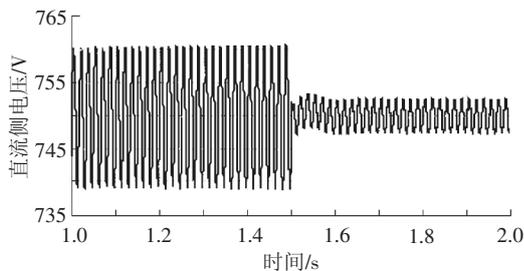


图 16 系统在 1.5 s 加入电流反馈补偿的直流侧电压波形

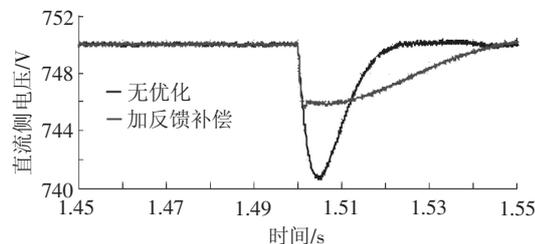


图 17 电流负载在 1.5 s 发生阶跃的系统响应波形

4.2 实验

为了验证电流反馈补偿方法的有效性,在实验室搭建一个 3 kW 的超级电容实验平台,实验平台框图见图 18。实验平台包括 3 个部分:变电所模拟系统、负载模拟系统、超级电容储能装置。

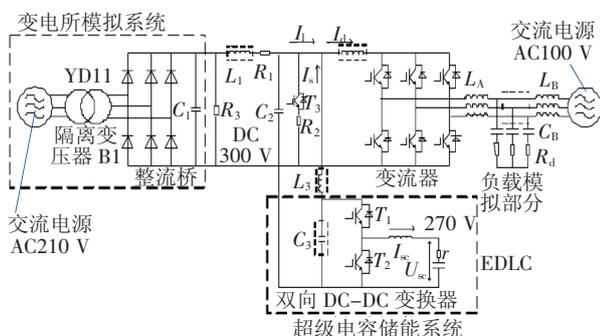


图 18 3 kW 超级电容实验平台系统框图

超级电容储能装置由双向 DC/DC 变换器和超级电容器组成。超级电容器额定电压为 320 V,容值为 1.5 F,内阻 2.75 Ω ,电感值为 7.5 mH,支撑电容为 3 300 μF 。实验平台见图 19。

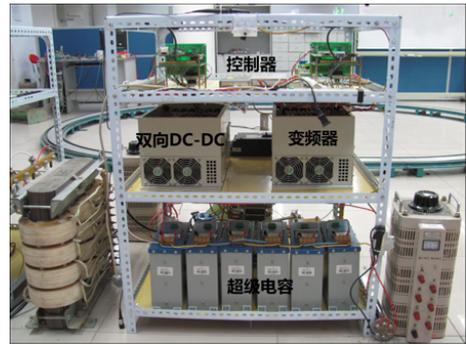
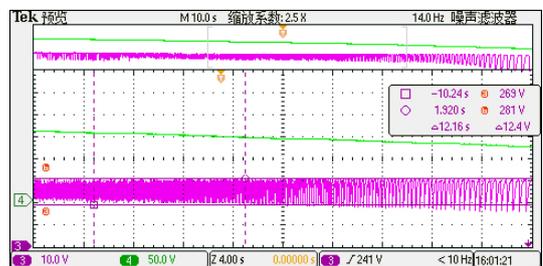


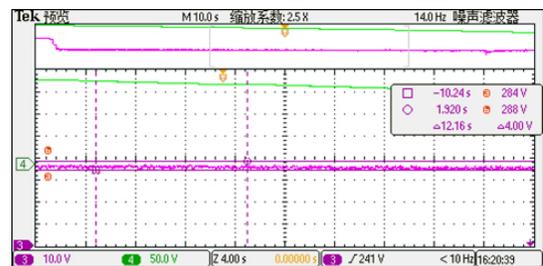
图 19 3 kW 实验平台

在实验中,先将超级电容器充电至 210 V,再将超级电容储能装置与负载模拟系统相连接。实验对比超级电容储能装置控制部分加入和不加入电流反馈补偿 2 种情况下直流母线电压波形。

由图 20 可以看出,系统控制不加入电流反馈补偿的情况下,直流母线电压波形振荡范围为 269~281 V,峰峰值为 12 V。系统控制加入电流反馈补偿后,直流母线电压波形振荡范围为 284~288 V,峰峰值为 4 V,振荡得到抑制。



(a) 不加入电流反馈补偿直流母线电压波形



(b) 加入电流反馈补偿直流母线电压波形

图 20 直流母线电压波形对比

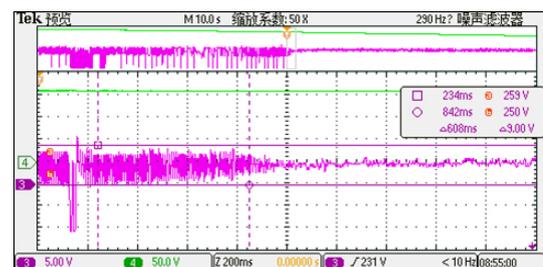


图 21 直流母线电压波形

图 21 的实验波形为超级电容储能装置在超级电

容电压低于 160 V 时加入电流反馈补偿控制的直流侧电压变化。可以看出,当超级电容储能装置加入电流反馈补偿控制后,直流侧电压振荡得到有效抑制。从实验可以得出,超级电容储能装置加入电流反馈补偿以降低闭环输出阻抗的方法,可以有效增加系统稳定性。

5 结论

从单个子系统出发,本文通过小信号分析法分析了超级电容储能装置单个子系统接不同负载的稳定性。为提高超级电容储能装置应用于城轨交通供电系统后的系统稳定性,本文采用电流反馈补偿来虚拟并联电阻的方法,降低超级电容储能装置的闭环输出阻抗,进而降低总城轨交通供电系统源端闭环输出阻抗。仿真和实验部分验证了论文提出方法的有效性。

参考文献:

- [1] 赵坤,杨中平,游小杰. 车载超级电容容量配置及控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2011,26(S):149-154.
ZHAO Kun, YANG Zhongping, YOU Xiaojie. Capacity Configuration and Control Strategy of the On-board Super Capacitor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011,26(S): 149-154.
- [2] 赵坤,王榭榕,王德伟,等. 车载超级电容储能系统间接电流控制策略[J]. 电工技术学报,2011,26(9):124-129.
ZHAO Kun, WANG Shenrong, WANG dewei, et al. Indirect Current Control Strategy of On-board Supercapacitor Energy Storage System of Railway Vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 124-129.
- [3] BARRERO R, TACKOEN X, VAN M J. Energy Savings in Public Transport[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2008, 3(3): 26-36.
- [4] WANG B, YANG Z, LIN F, et al. An Improved Genetic Algorithm for Optimal Stationary Energy Storage System Locating and Sizing[J]. Energies, 2014, 7: 6 434-6 458.
- [5] CICCARELLI F, DEL P A, IANNUZZI D. Improvement of Energy Efficiency in Light Railway Vehicles Based on Power Management Control of Wayside Lithium-ion Capacitor Storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29: 275-286.
- [6] REZA Teymourfar, BEHZAD Asaei, HOSSEIN Iman-Eini. Stationary Super-capacitor Energy Storage System to Save Regenerative Braking Energy in a Metro Line[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 56: 206-214.
- [7] 唐西胜. 超级电容器储能应用于分布式发电系统的能量管理及稳定性研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2006: 95-111.
- [8] 贾鹏宇. 高性能直流变换器系统稳定性问题研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2014: 5-12.
- [9] FENG Xiaogang, LIU Jinjun, LEE F C. Impedance Specifications for Stable DC Distributed Power Systems[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2002, 17(2): 157-162.
- [10] LUO S. A Review of Distributed Power Systems Part I: DC Distributed Power System[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2005, 20(8): 5-16.

(责任编辑 何 芳)